آنالیز عملکرد حرارتی برج‌های خنک‌کن خشک با مکش طبیعی بر مبنای روش نظری جدید*
مقاله پژوهشی

امین خداکرم تفتی[1]		علی‌اکبر گل‌نشان[2]

چکیده *در این پژوهش به تحلیل عملکرد یک برج خنک‌کن خشک با مکش طبیعی از نوع هلر در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس در شرایط محیطی مختلف (دمای محیط و سرعت باد) براساس یک روش نظری جدید پرداخته شده است. داده‌های خوانده‌شده از مرکز کنترل این نیروگاه برای برج هلر، صحت و دقت روش نظری را تأیید می‌کند. بنابراین یک مدل ریاضی جدید برای پیش‌بینی عملکرد برج در شرایط محیطی مختلف ایجاد شده است. این مدل فقط برای سرعت‌های باد کمتر از سرعت بحرانی، که معمولا مقداری بسیار بزرگ و غیرمعمول در شرایط عملیاتی برج است، کاربرد دارد. به کمک این مدل، برای برج هلر منفرد در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس نتیجه گرفته شد که در هنگام گرم‌تر شدن محیط، با افزایش سرعت باد، نرخ انتقال حرارت در برج با شیب کمتری کاهش می‌یابد. نتایج استفاده از روش نظری جدید برای محاسبهٔ عملکرد ۳برج هلر هم‌راستا در این نیروگاه، همراه با داده‌های اندازه‌گیری‌شده نشان داد در مواقعی که باد به‌طور عمود بر راستای برج‌ها می‌وزد، راندمان هر برج کمتر از راندمان همان برج در حالت منفرد می شود. در مواقعی که جهت وزش باد هم‌جهت با را ستای برج‌ها باشد، راندمان برج‌های پشتی نسبت به برج خط حمله افزایش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی برج خنک‌کن خشک با مکش طبیعی، هلر، عملکرد حرارتی، مدل ریاضی، برج‌های خنک‌کن هم‌راستا.

مقدمه

نیروگاه‌های حرارتی از بخش‌های صنعتی مهم و حساس هر کشور برای تولید برق است؛ به این دلیل، بررسی و تحلیل تمام اجزایی که می‌توانند باعث افت عملکرد نیروگاه شوند، امری بسیار ضروری تلقی می‌شود. عوامل متعددی وجود دارد که باعث می‌شود مقدار توان تولیدی توربین بخار یک نیروگاه حرارتی کمتر از حد پیش‌بینی‌شده باشد. یکی از این عوامل، خوب‌خنک‌نشدن آب‌خنک‌کن نیروگاه در هنگام عبور از برج خنک‌کن است. این مسئله باعث می‌شود آبی که وارد کندانسور شده است نتواند به حد کافی بخار را چگالیده کند و درنتیجه پس‌فشار توربین را افزایش دهد که درنهایت باعث می‌شود توان تولیدی توربین کم شود. یکی از انواع برج‌های خنک‌کن، برج خنک‌کن خشک با مکش طبیعی است که به‌علت نقش مهم آن در صرفه‌جویی آب، در دهه‌های گذشته بسیار به آن توجه شده است. این نوع برج‌ها نسبت به بقیه، بیشتر از شرایط محیطی اطراف خود تأثیر می‌پذیرند و در شرایط آب‌وهوایی نامطلوب امکان افت شدید عملکرد دارند. تاکنون مطالعات بسیاری برای بررسی عملکرد این نوع برج‌ها در شرایط محیطی مختلف انجام و پیشنهادهایی برای افزایش بازدهی آن‌ها در شرایط بد آب‌وهوایی ارائه شده است. این مطالعات در بخش بعد مرور می‌شود.

پیشینهٔ پژوهش

دوپریز و کروگر [1] جزو اولین محققانی‌اند که اثر باد را بر عملکرد برج‌های خنک‌کن خشک بررسی کردند. آن‌ها با اندازه‌گیری‌های تجربی بر یک نمونهٔ واقعی از برج خنک‌کن خشک واقع در نیروگاه کندال آفریقای جنوبی، نشان دادند که با افزایش سرعت باد عملکرد برج

* تاریخ دریافت مقاله ۹۹/۱/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۰۰/۲/۷ می‌باشد.		**DOI:**10.22067/jacsm.2021.56554.0

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشجوی دکترای تخصصی، بخش مهندسی مکانیک حرارت و سیالات، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز.
Email: am.khodakaram@shirazu.ac.ir

(۲) دانشیار، بخش مهندسی مکانیک حرارت و سیالات، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز.

ضعیف می‌شود. وی و همکاران [2] با استفاده از اندازه‌گیری‌های تجربی بر روی برج خنک‌کن خشک واقع در استان شانسکی چین و همچنین تست مدل آزمایشگاهی آن در تونل باد، نشان دادند که در مواقع وزش باد، تشکیل توزیع فشار نامطلوب در ورودی برج و ایجاد پدیدهٔ درپوشی (خفگی) در دهانهٔ بالایی آن، علت کاهش عملکرد برج خنک‌کن است. سو و همکاران [3] جریان سیال و توزیع دما در اطراف و داخل یک برج خنک‌کن خشک از نوع هلر را به کمک روش عددی حجم محدود مدل کردند. آن‌ها نشان دادند که در شرایط حضور باد، ایجاد میدان سیال کم‌فشار در اطراف برج مانع عبور هوا از رادیاتورهای مربوط می‌شود، بنابراین باعث افزایش دمای آب عبوری از آن قسمت از برج می‌شود. در این مطالعه به پدیدهٔ درپوشی دهانهٔ خروجی برج در مواقع وزش باد نیز اشاره شده است. این پدیده باعث می‌شود دبی هوای خروجی از برج کم شود و در نتیجهٔ آن عملکرد حرارتی برج ضعیف شود. آل ویکد و بهنیا [4] به بررسی عملکرد حرارتی یک برج خنک‌کن خشک با مکش طبیعی در شرایط وزش باد به کمک شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که عملکرد حرارتی برج در دماهای محیط متفاوت، با تغییر سرعت باد، با رفتار مشابهی تغییر می‌کند. آن‌ها همچنین اثر دیواره‌های بادشکن بر عملکرد حرارتی برج را در سرعت‌های مختلف وزش باد بررسی و آن را به‌عنوان راه‌حلی برای کاهش اثرات منفی سرعت‌های زیاد باد معرفی کردند. غفاری و همکاران [5] به کمک شبیه‌سازی عددی توانستند یک برج خنک‌کن خشک با مکش طبیعی را در شرایط مختلف آب‌وهوایی مدل کنند. آن‌ها نشان دادند که در سرعت باد ۱۵متر بر ثانیه، عملکرد حرارتی برج بیش از ۳۰درصد کم می‌شود و در دماهای محیط ۲۸۸ تا ۳۰۰کلوین، رفتار تغییرات عملکرد حرارتی برج با سرعت باد مشابه بوده و نرخ کاهش آن ۲۰ تا ۳۵درصد است. Ma و همکاران [6] اثر دمای هوای محیط و سرعت باد را بر روی عملکرد حرارتی یک برج خنک‌کن خشک به‌صورت عددی بررسی کردند و نشان دادند که در شرایط پایا و در بار ثابت، تغییرات دمای آب خروجی از برج با تغییر دمای هوای محیط، خطی و با تغییر سرعت باد، غیرخطی است. اردکانی و همکاران [7] به‌صورت اندازه‌گیری‌های میدانی توانستند عملکرد حرارتی یک برج خنک‌کن از ۳برج خنک‌کن خشک هلر نیروگاه منتظر قائم (کرج، ایران) را ارزیابی کنند. آن‌ها نشان دادند که در شرایط وزش باد، مبدل‌هایی که مستقیم در معرض وزش باد قرار دارند، نسبت به مبدل‌هایی که موازی با سرعت باد قرار گرفته‌اند، عملکرد بهتری دارند. شمسی‌پور وگل‌نشان[۸] به مدل‌سازی عددی یک برج خنک‌کن خشک از نوع هلر پرداختند و با اعمال اثر باد بر نواحی ورودی و خروجی برج به‌صورت مجزا، عملکرد رادیاتورهای برج را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اثر باد بر دهانه خروجی برج به‌مراتب بیشتر از تأثیر آن بر ناحیهٔ ورودی برج بوده است و عملکرد حرارتی رادیاتورهای برج را بیشتر تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. وزش باد در مقابل برج خنک‌کن، دبی جرمی هوای خروجی از برج را کاهش می‌دهد و این پدیده مستقیم بر دبی هوای مکیده‌شده در پایین برج تأثیر می‌گذارد، زیرا در مسائل انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی (مانند برج خنک‌کن) معادلات انتقال جرم، مومنتوم و انرژی (به‌علت تغییرات چگالی با دما) با یکدیگر کوپل هستند [9]. ازاین‌رو، هومن [9] به کمک آنالیز ابعادی، تأثیر وزش باد را بر دبی جرمی هوای خروجی از برج بررسی کرد و موفق شد مدل تئوری ساده‌ای را برای پیش‌بینی تأثیر وزش باد بر عملکرد حرارتی برج ایجاد کند. اشکال مدل هومن [9] در بررسی‌نکردن پارامتر دمای محیط در پیش‌بینی میزان حرارت منتقل‌شده در برج است، درحالی‌که این پارامتر از مقادیر بسیار مهم و اساسی در تعیین عملکرد برج است [10]. برای رفع این مشکل، Ma و همکاران [10] مدل تئوری جدیدی را ارائه کردند که هر ۲پارامتر سرعت باد و دمای محیط را شامل می‌شود. این مدل که

در قالب الگوریتم جبری ارائه شده است، برمبنای مطالعات Ma و همکاران [6] و هومن [9] به‌دست آمده است و طبق آن عملکرد هر برج خنک‌کن خشک با مکش طبیعی در شرایط محیطی مختلف محاسبه می‌شود. مقایسهٔ نتایج اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط این مدل برای مقدار عملکرد یک برج ۶۵۰ MW_{th} نشان داده است که بیشینه خطای نسبی مدل کمتر از ۸درصد است.

از آن‌جا که در نیروگاه‌های حرارتی معمولا چندین برج خنک‌کن وجود دارد، چینش برج‌ها از لحاظ تأثیرگذاشتن بر میدان جریان اطراف هر برج، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تاکنون چندین پژوهش دراین‌زمینه انجام شده است. فو و ژایی [11] ۲ برج خنک‌کن هلر کنار هم واقع در نیروگاه داتونگ شماره۲ کشور چین را مدل‌سازی عددی کردند و به بررسی تأثیر وزش باد بر عملکرد آن‌ها پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که وزش باد بر عملکرد ۲برج کنار هم، مانند برج منفرد، تأثیر منفی می‌گذارد و این تأثیر برای سرعت‌های باد کمتر از ۱۰ m/s در برج بالادست جریان نسبت به برج پشتی، شدیدتر است. غفاری‌گوشه و گل‌نشان[۱۲] ۳ برج خنک‌کن هلر هم‌راستا در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس را مدل‌سازی عددی سه‌بعدی کردند و در شرایط وزش باد، عملکرد هرکدام از برج‌ها و اثرات آن‌ها بر یکدیگر را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که وقتی ۳ برج در امتداد هم قرار می‌گیرند، عملکرد بهتری دارند نسبت به حالتی که به‌صورت منفرد قرار می‌گیرند. آروین‌فر[۱۳] فاصله بین ۳برج خنک‌کن هلر با چیدمان مثلثی را در شرایط وزش باد مطالعه عددی کرد. وی فاصلهٔ بهینه برج‌ها را دوبرابر قطر پایهٔ برج گزارش کرده است.

اهداف این پژوهش

همان‌طور که در مطالعات پیشین بررسی شد، برای بررسی عملکرد برج‌های خنک‌کن خشک عمدتا از ۲روش مدل‌سازی عددی و اندازه‌گیری‌های تجربی استفاده شده است. از آن‌جا که برج‌های خنک‌کن خشک نیروگاهی سازه‌های بزرگی هستند، مدل‌سازی و تحلیل عددی آن‌ها برای تمام شرایط محیطی کاری دشوار و بسیار زمان‌بر است و همچنین اندازه‌گیری‌های تجربی روی نمونه‌های واقعی از آن‌ها نیز به‌علت شرایط ناپایدار و محدود محیطی، نتایج کامل و دقیقی نمی‌دهد. مهندسان صنعت نیروگاهی همواره به‌دنبال روشی سریع برای پیش‌بینی اولیهٔ عملکرد برج‌های خنک‌کن در شرایط محیطی مختلف هستند. این روش باید به‌گونه‌ای باشد که بدون استفاده از نرم‌افزارهای خاص و اجراهای سنگین بتواند صرفا با روابط ریاضی جبری، تخمین اولیه‌ای از عملکرد برج بدهد. مطالعات تئوری و مدل‌های استخراج شده از این نوع مطالعات عمدتا می‌تواند برای رسیدن به چنین روابط ریاضی جبری بسیار کمک‌کننده باشد.

از اولین مطالعات تئوری دراین‌زمینه می‌توان به پژوهش هومن [9] اشاره کرد. وی جزو اولین پژوهشگرانی است که اثر وزش باد را بر عملکرد برج‌های خنک‌کن خشک با مکش طبیعی به‌صورت تئوری بررسی کرد. بیشینه خطای نسبی پیش‌بینی‌ها در این مطالعه نسبت به داده‌های آزمایشگاهی ۱۵درصد بیان شده است. بعد از این مطالعه، Ma و همکاران [10] الگوریتم جدیدی برای محاسبهٔ عملکرد برج‌ها به‌دست آوردند که در آن، هم شرایط وزش باد و هم دمای محیط در نظر گرفته شده است. از پارامترهای ورودی مهم این الگوریتم علاوه بر مشخصات فیزیکی برج و مشخصات مبدل‌ها، تعریف شرایط مرجع برای برج است که معمولا با آزمایش و داده‌برداری به‌دست می‌آید. منظور از شرایط مرجع، داده‌های واقعی عملکردی برج در یک شرایط محیطی طبیعی است. شرایط محیطی شامل دمای محیط و سرعت باد و شرایط عملکردی شامل دمای آب ورودی به برج، دمای آب خروجی از آن، دبی گذرنده و غیره است. تنها محدودیت الگوریتم ارائه‌شدهٔ Ma و همکاران [10] این است که سرعت باد از مقدار بحرانی آن کمتر باشد. منظور از سرعت باد بحرانی، سرعتی است

که در آن میزان حرارت منتقل‌شده در برج، برای دمای آب ورودی ثابت، به کمینه مقدار می‌رسد [10].

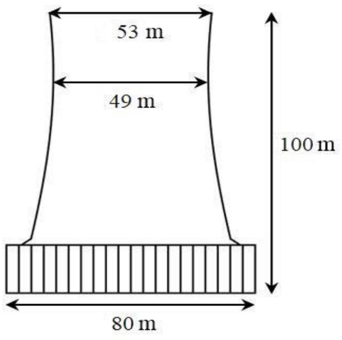
مطالعات تئوری دراین‌زمینه پیشرفت چشمگیری داشته‌اند، اما همچنان دارای الگوریتم‌های پیچیده‌ای برای محاسبه عملکرد هستند و تاکنون مطالعه‌ای برای ارائهٔ مدل‌های ریاضی جبری با خطای نسبی مقبولی انجام نشده است. بنابراین از اهداف این پژوهش، ارائهٔ روشی برای رسیدن به مدل جبری ساده‌ای برای محاسبهٔ عملکرد برج‌های خنک‌کن خشک است. در قسمت اول این پژوهش، برای یک برج هلر در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس به کمک الگوریتم تئوری جدید [10]، روشی نوین ارائه شده است که منجر به مدل ریاضی جبری ساده‌ای برای محاسبه عملکرد این برج در شرایط محیطی مختلف (سرعت باد و دمای محیط) می‌شود. در ادامه با این مدل ریاضی عملکرد برج در شرایط محیطی مختلف تحلیل شده است. لازم به ذکر است که فرایند مدل‌سازی ارائه‌شده در این پژوهش مخصوص برج هلر نیروگاه سیکل ترکیبی فارس نبوده است و می‌تواند برای برج‌های خنک‌کن خشک دیگر نیز اعمال شود. همچنین، امکان گسترش مدل ریاضی ارائه‌شده برای برج‌های خنک‌کن خشک مطالعات دیگر نیز بررسی شده است. در قسمت دوم پژوهش به کمک روش تئوری جدید، عملکرد ۳برج موجود در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس، با تأکید بر نحوهٔ چینش آن‌ها (هم‌راستا)، در شرایط محیطی مختلف تحلیل و بررسی شده است. لازم به ذکر است همهٔ محاسبات در این مطالعه با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار Matlab انجام شده است.

برج‌های خنک‌کن مطالعه‌شده و معادلات مربوط

برج‌های خنک‌کن مطالعه‌شده، ۳ برج خنک‌کن خشک با مکش طبیعی (هلر) هستند که مطابق شکل (۱) به‌صورت هم‌راستا (در جهت شمال‌غربی- جنوب‌شرقی) در منطقه نیروگاه سیکل ترکیبی فارس (طول جغرافیایی ۵۲درجه و ۲٦دقیقه و عرض جغرافیایی ۲۹درجه و ۳٦دقیقه) نصب شده‌اند[١٤]. هر ۳برج هذلولی‌شکل و از جنس بتن بوده و دارای ابعاد هندسی مطابق با شکل (۲) است. لازم به ذکر است که فاصله بین مرکز هر برج تا مرکز دیگری ۱۲۸متر است. اطلاعات مربوط به شرایط طراحی برج‌ها در جدول (۱) آورده شده است [15]. مبدل‌های حرارتی هر برج از نوع مبدل‌های حرارتی فشرده نوع فورگو، تی٦٠ بوده که مشخصات فنی آن در جدول (۲) آورده شده است [16].



شکل ۱ ۳ برج هلر هم‌راستا واقع در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس [١٤]



شکل ۲ ابعاد هندسی برج هلر نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

جدول ۱ شرایط طراحی برج‌های خنک‌کن نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

درجه‌حرارت طراحی محیط	۱۵ درجه سانتی‌گراد
اختلاف درجه‌حرارت محیط و چگالنده (بدون وزش باد)	۲۸/۵۸ درجه
اختلاف درجه‌حرارت محیط و چگالنده (همراه با وزش باد)	۲۹/۵۵ درجه
میزان آب در گردش در مجموعه مبدل‌ها	٤/۸ مترمکعب بر ثانیه
میزان حرارت دفع‌شده از برج	۲۱٤/۳ مگاوات

جدول ۲ مشخصات فنی مبدل‌های حرارتی به‌کاررفته در برج‌های هلر نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

آرایش لوله‌ها	مثلثی
تعداد کل لوله‌ها	۲٤۰ عدد
تعداد ردیف لوله‌ها	٦ عدد
تعداد لوله‌ها در هر ردیف	٤۰ عدد
ضخامت لوله‌ها	۰/۷۵ میلی‌متر
ارتفاع المان‌های حرارتی	۵ متر
زاویهٔ بین المان‌های حرارتی	٤۹/۰٦ درجه
عرض المان‌های حرارتی	۲/٤ متر
پهنای المان‌های حرارتی	۰/۱۵ متر
تعداد مبدل‌های حرارتی	۹٤ مبدل ۱۵ متری، ۲ مبدل ۱۰ متری
نوع پره‌ها	فین‌های صفحه‌ای شیاردار
ضخامت پره‌ها	۰/۳۳ میلی‌متر
فاصله پره‌ها از یکدیگر	۲/۸٦ میلی‌متر

حرارت گرفته‌شده از آب گردشی در برج با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود.

$$\dot{Q} = \dot{m}_a C_{p_a}(T_{a,o} - T_{a,i}) \quad (۱)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_w C_{p_w}(T_{w,i} - T_{w,o}) \quad (۲)$$

برای تجزیه و تحلیل حرارتی رادیاتورهای برج از روش ε-NTU استفاده شده است. براین‌اساس، حرارت مبادله‌شده از رابطهٔ (۳) به‌دست می‌آید.

$$\dot{Q} = \varepsilon C_{min}(T_{w,i} - T_{a,i}) \quad (۳)$$

$$C_{min} = \min(\dot{m}_a C_{p_a}, \dot{m}_w C_{p_w}) \quad (٤)$$

معادلهٔ (۵) ارتباط بین NTU و ε را برای مبدل های حرارتی با لوله‌های پره‌دار به‌دست می‌دهد [17].

$$\varepsilon = 1 - \exp\left[NTU^{0.22} . \frac{\exp(-C_r . NTU^{0.78}) - 1}{C_r} \right] \quad (۵)$$

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (٦)$$

ضریب انتقال حرارت کلی سمت آب‌وهوای مبدل‌های حرارتی نوع فورگو به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [16]:

$$\frac{1}{UA_f} = \frac{1}{h_{w,I}A_I} + \frac{1}{\eta h_{a,f}A_f} + \frac{t}{kA_m}$$

For Forgo-type heat exchangers

(۷)

در محاسبات مربوط به سیستم هلر همهٔ ضرایب انتقال حرارت برحسب سطح جلویی محاسبه می‌شود، بنابراین معادلهٔ بالا به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{1}{U_c\left(\frac{A_f}{A_{fr}}\right)}=\frac{1}{h_{w,I}\left(\frac{A_I}{A_{fr}}\right)}+\frac{1}{\eta h_{a,f}\left(\frac{A_f}{A_{fr}}\right)}+\frac{t}{k\left(\frac{A_m}{A_{fr}}\right)} \quad (۸)$$

از آن جایی که برای م‌بدل های حرارتی فورگو ا ستفاده شده در برج هلر، اندازه‌ها و پارامترهای فیزیکی معلوم ا ست، می‌توان برای ساده شدن روابط فر ضیات زیر را انجام داد:

$$h_w=h_{w,I}\left(\frac{A_I}{A_{fr}}\right) \quad (۹)$$

$$h_a=1/\left[\frac{1}{\eta h_{a,f}\left(\frac{A_f}{A_{fr}}\right)}+\frac{t}{k\left(\frac{A_f}{A_{fr}}\right)}\right] \quad (۱۰)$$

$$U=U_c\left(\frac{A_f}{A_{fr}}\right) \quad (۱۱)$$

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{h_w}+\frac{1}{h_a} \quad (۱۲)$$

برای محاسبهٔ ضریب انتقال حرارت سمت آب‌وهوا روابط تجربی زیر پیشنهاد شده است [16]:

$$h_w=(319+5.67T_{w,mean})\dot{m}_w^{0.8} \quad (۱۳)$$

$$h_a=1180\left[\frac{G_1}{A_F}\left(\frac{\gamma_{a,0}}{\gamma_{a,mean}}\right)^{0.64}\right]^{0.515} \quad (۱٤)$$

نتایج و بحث

برای بررسی تأثیر پارامترهای محیطی بر روی برج‌های هلر نیروگاه سیکل ترکیبی فارس، داده‌های زیر برای هر برج، هر ۱۵ دقیقه در طول روز از مرکز کنترل نیروگاه خوانده و جمع‌آوری شد: دبی آب گذرنده از برج، دمای آب ورودی به برج، دمای آب خروجی از برج، دمای هوای محیط، سرعت و جهت باد در محل.

به‌علت ناپایداربودن شرایط محیطی، تأثیرپذیری برج‌ها از شرایط اطراف خود تأخیر دارد، بدین معنی که بلافاصله پس از تغییر پارامترهای محیطی، عملکرد برج‌ها تغییر نمی‌کند. بنابراین برای حذف این تأخیر، داده‌های خوانده‌شده در طول یک ساعت میانگین‌گیری شدند.

مدل‌سازی ریاضی یک برج هلر در نیروگاه و اعتبارسنجی آن

غفاری‌گوشه و گل‌نشان [۱۲] نشان دادند در شرایط وزش باد با سرعت کم، ۳ برج هم‌راستا مانند یک برج منفرد در معرض وزش باد عمل می‌کنند. بنابراین برای بررسی عملکرد برج منفرد در شرایط جوی آرام، داده‌های برج خط حمله در یک ساعت خوانده و میانگین‌گیری شده و به‌عنوان حالت مرجع برای استفاده در الگوریتم Ma و همکاران [10] قرار داده شده است. شرایط محیطی در حالت مرجع و همچنین نتایج حل عددی معادلات (۱)، (۲) و (۳) که پارامترهای حالت مرجع برج را به‌دست می‌دهد، در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳ پارامترهای حالت مرجع برج هلر نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

دمای آب ورودی به برج (°C)	٦٠/٩٧
دمای آب خروجی از برج (°C)	٥١
دبی حجمی آب گذرنده از برج (m^3/s)	٤/٧٤
دمای هوای اطراف برج (°C)	٣٠/٠٨
سرعت باد (m/s)	١/٩٨
نرخ گرمای گرفته‌شده از آب (MW)	١٩٤/٧٨

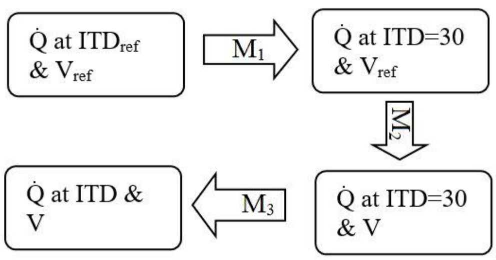
برای بررسی درستی و دقت الگوریتم، در چندین روز داده‌های دیگری برای همان برج خوانده و با مقدار پیش‌بینی‌شده الگوریتم مقایسه شد که در جدول (٤) نمایش داده شده است. مقدار خطای نسبی (ستون هفتم) استفاده از الگوریتم در جدول بالا نشان می‌دهد که نتایج

این شبیه‌سازی خوب بوده و مقبول است.

برای ارائهٔ مدلی جامع برای محاسبهٔ گرمای مبادله‌شده در برج هلر منفرد با استفاده از الگوریتم Ma و همکاران [10] فلوچارتی مطابق با شکل (۳) تنظیم شده است که روند رسیدن به عملکرد برج در شرایط محیطی دل‌خواه (ITD, V) به‌وسیلهٔ حالت مرجع (ITDref, Vref) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، برای رسیدن به مقدار عملکرد برج در شرایط دل‌خواه، ۳مرحله باید انجام شود. در مرحلهٔ اول، عملکرد برج در شرایط (ITD=30, Vref) با استفاده از شرایط مرجع محاسبه می‌شود. در مرحلهٔ دوم، با استفاده از مقدار محاسبه‌شده در مرحلهٔ اول، عملکرد برج در شرایط (ITD=30, V) محاسبه می‌شود و درنهایت در مرحلهٔ آخر، با استفاده از مقدار به‌دست‌آورده‌شده در مرحلهٔ قبل، عملکرد برج در شرایط مجهول به‌دست می‌آید. همان‌طور که گفته شد، هستهٔ اصلی محاسبات در هر مرحله، الگوریتم Ma و همکاران [10] است. نحوهٔ محاسبات به این ترتیب است که در هر مرحله، مقدار اولیهٔ عملکرد برج ($\dot{Q}$) در همان مرحله به‌عنوان پارامتر معلوم قرار گرفته و همراه با سایر مشخصات فیزیکی برج و مبدل‌ها به‌عنوان ورودی الگوریتم یادشده در نظر گرفته می‌شود و پارامتر خروجی برنامه که مقدار عملکرد برج ($\dot{Q}$) در شرایط خواسته‌شدهٔ آن مرحله است، با برنامه‌نویسی و اجرای برنامه به‌دست می‌آید. بنابراین شرایط معلوم در مراحل اول، دوم و سوم به‌ترتیب (ITDref, Vref)، (ITD=30, Vref) و (ITD=30, V) و شرایط مجهول خواسته‌شده در این مراحل به‌ترتیب (ITD=30, Vref)، (ITD=30, V) و (ITD, V) است

جدول ٤ مقایسهٔ دمای آب خروجی اندازه‌گیری‌شده در برج هلر نیروگاه سیکل ترکیبی فارس با مقدار پیش‌بینی‌شدهٔ الگوریتم

حالت	دمای هوای محیط (°C)	سرعت باد (m/s)	دمای آب ورودی به برج(°C)	دمای آب خروجی اندازه‌گیری‌شده (°C)	دمای آب خروجی پیش‌بینی‌شده (°C)	خطای نسبی (درصد)
١	٣٠/٠٨	٢/٢٣	٥٩/٧٣	٥١	٥٠/٣٣	١/٣١
٢	٢٨/٢٢	٢/٧٦	٦٠/١	٥١/٠٥	٥٠/١٥	١/٧٦
٣	٢٧/٠٢	١/١١	٥٧/٣٦	٤٨/٥٢	٤٧/٣١	٢/٤٩
٤	٢٦/٤٧	١/٣٥	٥٧/٣٤	٤٨/٢٥	٤٧/٣٩	١/٧٨
٥	٢٥/٩	١/٦٨	٥٦/٢١	٤٧/٥٤	٤٦/٥٦	٢/٠٦
٦	٢٦/٣٩	٢/١٢	٥٦/٨٨	٤٨/١٦	٤٧/٢٣	١/٩٣



شکل ۳ فلوچارت محاسبهٔ عملکرد برج هلر در شرایط محیطی دل‌خواه با استفاده از حالت مرجع

در مراحل اول، دوم و سوم، با تقسیم مقدار $\dot{Q}$ به‌دست‌آورده‌شده به مقدار $\dot{Q}$ اولیهٔ آن مرحله، به‌ترتیب ضرایب M_1، M_2 و M_3 به‌دست می‌آید. درنتیجه، میزان حرارت منتقل‌شده در برج در شرایط محیطی دل‌خواه (ITD, V) را می‌توان با استفاده از رابطهٔ (۱۵) به‌دست آورد.

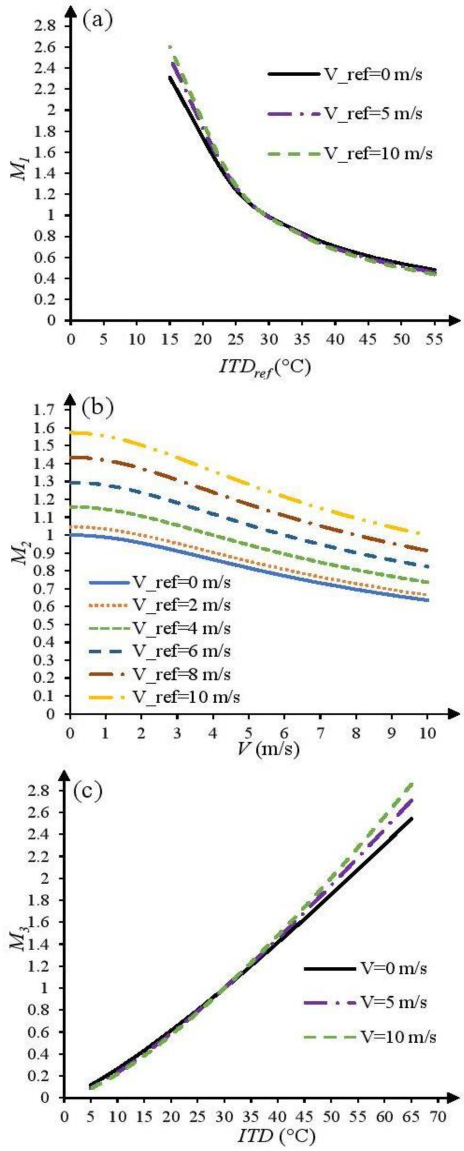
$$\dot{Q} = M_1 M_2 M_3 \dot{Q}_{ref} \tag{۱۵}$$

با روش شرح‌داده‌شده، ضرایب M_1، M_2 و M_3 برای برج هلر نیروگاه سیکل ترکیبی فارس محاسبه شده و به‌صورت نمودارهایی در شکل ((a-c)–٤) آورده شده است.

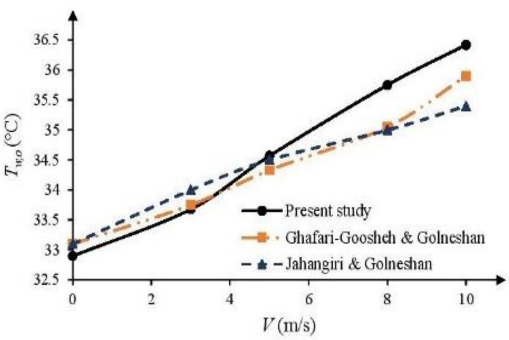
لازم به ذکر است که برای استفاده از رابطهٔ (۱۵)، مانند الگوریتم Ma و همکاران [10]، باید سرعت باد کمتر از سرعت باد بحرانی باشد. طبق مطالعات غفاری‌گوشه و گل‌نشان[۱۲] این سرعت برای برج‌های نیروگاه سیکل ترکیبی فارس بیشتر از ۱۰متر بر ثانیه است.

غفاری‌گوشه و گل‌نشان[۱۲] و جهانگیری و گل‌نشان[۱۸] به بررسی اثر سرعت باد بر برج هلر منفرد از نوع برج‌های سیکل ترکیبی فارس با استفاده از روش عددی (دینامیک سیالات محاسباتی) پرداختند. شکل (۵) دمای آب خروجی از برج را با استفاده از نتایج این پژوهش همراه با ۲ مطالعهٔ بالا نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در هر ۲ مطالعه یادشده، برج‌ها باتوجه‌به شرایط طراحی در نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند. بنابراین، حالت مرجع در استفاده از الگوریتم، شرایط طراحی برج در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از روش یادشده در این مطالعه به‌خوبی با دیگر روش‌ها تطابق داشته است و این امکان را می‌دهد که عملکرد برج را برای هر شرایط محیطی دیگر، بدون نیاز به روش‌ها و تحلیل‌های عددی دشوار و زمان‌بر، با استفاده از رابطهٔ (۱۵) و شکل ((a-c)–٤) با دقت مناسبی محاسبه کرد.

با استفاده از رابطهٔ ریاضی به‌دست‌آمده برای برج نیروگاه سیکل ترکیبی فارس، برج‌های خنک‌کن خشک مطالعات دیگر نیز بررسی و مقایسه شده‌اند. شرایط مرجع برای هرکدام از برج‌ها برابر با شرایط طراحی آن‌ها در نظر گرفته شده است. جدول (۵) داده‌های اندازه‌گیری‌شده برای برج ٦٠٠ MW_{th} مطالعه‌شده توسط Ma و همکاران [10] را با مقادیر پیش‌بینی‌شدهٔ روش تئوری جدید [10] و مدل ریاضی گفته‌شده مقایسه می‌کند. همان‌طور که در این جدول مشهود است، بیشینه خطای نسبی در پیش‌بینی میزان حرارت گرفته‌شده از آب در برج برای روش تئوری جدید ۸درصد و برای مدل ریاضی ۱۳ درصد است و این بدین معنی است که رابطهٔ ریاضی (۱۵) برای برج هلر نیروگاه سیکل ترکیبی فارس به‌دست آمده، اما با دقت مقبولی می‌تواند عملکرد برج دیگری را که در اندازه و نوع با برج گفته‌شده متفاوت است، پیش‌بینی کند. با بررسی برج‌های بیشتر می‌توان با قطعیت بیشتری به این مهم دست یافت. شکل (٦) مربوط به برج مطالعه‌شدهٔ سو و همکاران [3] و شکل (۷) مربوط به برج مطالعه‌شدهٔ ژائو و همکاران [19] است. همان‌طور که از این ۲شکل نیز مشخص است، شکل ((a-c)–٤) برای برج نیروگاه سیکل ترکیبی فارس به‌دست آمده است، اما دیگر برج‌ها نیز در برابر تغییر پارامترهای محیطی روند تقریبا مشابهی دارند. این بدین معنی است که برج‌ها در مقابل تغییرات پارامترهای محیطی رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهند. بنابراین به‌نظر می‌رسد که با بررسی و مقایسهٔ برج‌های بیشتر و متنوع‌تر بتوان نمودارهای جامعی برای استفاده در رابطهٔ (۱۵) به‌دست آورد، به‌طوری‌که مستقل از مشخصات هندسی برج و پارامترهای مربوط به مبدل‌ها باشد.



شکل ٤ ضرایب M_1، M_2و M_3 در مدل ریاضی (رابطهٔ (١٥)) برای برج خط حملهٔ نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

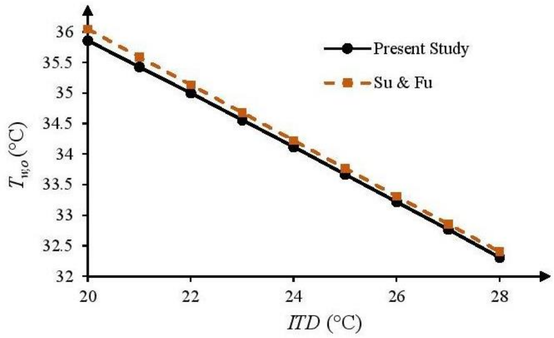


شکل ٥ اعتبارسنجی این مطالعه با نتایج به‌دست‌آمده در مطالعهٔ غفاری‌گوشه و گل‌نشان [١٢] و

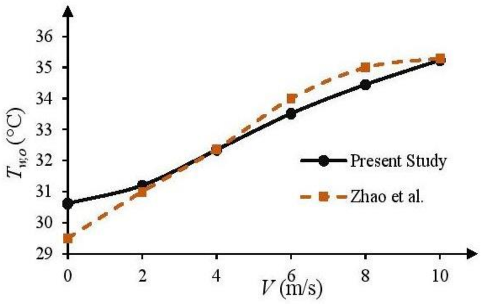
جهانگیری و گل‌نشان [۱۸] در شرایط ITD=28.6

جدول ۵ مقایسهٔ پیش‌بینی‌های به‌دست‌آمده از طریق روش تئوری جدید [10] و مدل ریاضی ایجادشده برای برج مطالعه‌شدهٔ Ma و همکاران [10]

حالت	سرعت باد (m/s)	اختلاف دمای ولیه (°C)	دمای آب خروجی از برج (°C)			نرخ گرمای گرفته‌شده از آب (MW)			خطای نسبی در پیش‌بینی نرخ گرمای گرفته‌شده از آب درصد	
			اندازه‌گیری شده	تئوری Ma و همکاران	مدل ریاضی	اندازه‌گیری شده	تئوری Ma و همکاران	مدل ریاضی	تئوری Ma و همکاران	مدل ریاضی
۱	۲/۸۸	۳۰/۸۹	۳۹/۹۵	۳۹/۵۹	۳۹/۸۳	۷۰۳/۰۹	۷۳۲/٤	۷۱۲/٤۲	٤/۱۷	۱/۳۳
۲	۲/۵۸	۲۷/٤	۳۷/۸۹	۳۷/٤٦	۳۷/۷	٦۰٦/۷۵	٦٤۱/۵۸	٦۲۱/۷۱	۵/۷٤	۲/٤۷
۳	٦/۸٤	۳٦/۵	٤٦/۱۱	٤٦/۱۷	٤٦/۸۲	۷۷۷/۰۲	۷۷۲/۲٦	۷۱۹/۰۲	−۰/٦۱	−۷/٤٦
٤	۷/۳۲	۳۷/۳۹	٤۹/۵۳	٤۹/۸	۵۰/٤۹	۸۰۳/۷۸	۷۸۲/۱	۷۲۵/۸۲	−۲/۷	−۹/۷
۵	٤/٤۲	۳٤/۸٦	٤۷/۸۹	٤۷/۵۲	٤۷/۹۱	۷۷۰/۵۱	۸۰۰/۵۷	۷٦۸/۰۸	۳/۹	−۰/۳۲
٦	۰/۵٤	۲۷	٤۲/۵۱	٤۱/۹۳	٤۲	٦۱۵/۵۵	٦٦۳/۱	٦۵٦/۹٦	۷/۷۲	٦/۷۳
۷	۳/٤۳	۳۲/۲۹	٤۷/۰۹	٤٦/٦٤	٤٦/۹۳	۷۲۰/۱۷	۷۵۷/۵٦	۷۳۳/۰٤	۵/۱۹	۱/۷۹
۸	۵/۱۹	۳٦/۳۹	۵۵/۰۵	۵٤/۵۹	۵۵/۰۹	۷۸۱/۷۲	۸۱۹/۲۷	۷۷۹/۹۳	٤/۸	−۰/۲۳
۹	٤/۸۵	۳۵/۳۵	۵٤/٦۹	۵٤/۵۵	۵۵	۷۸۹/٤۳	۸۰۱/۰٤	۷٦٤/٤۱	۱/٤۷	−۳/۱۷
۱۰	٤/٦۵	۳٤/۸۲	۵٦/۸۱	۵٦/۲۸	۵٦/۷۱	۷٤۸/۹	۷۹۲/۳٦	۷۵۷/٤۹	۵/۸	۱/۱۵
۱۱	۰/۹٤	۲۱/۷٤	۳۸/۳	۳۸/۰۵	۳۸/۱۸	٤۹۱/٦۲	۵۱۲/٤۱	۵۰۱/۳۳	٤/۲۳	۱/۹۸
۱۲	۳/۲	۲۲/۷۱	۳۷/۳۵	۳۷/٦	۳۷/۹	۵۱۹/۳۹	٤۹۹/۳٦	٤۷۳/۷٤	−۳/۸٦	−۸/۷۹
۱۳	۱/۸٤	۲۳/۹۳	٤۲/۰۳	٤۱/٦	٤۱/۷۹	۵۲۵/۱۱	۵٦۰/۲۱	۵٤٤/٤٤	٦/٦۸	۳/٦۸
۱٤	۰/٦۳	۲٤/۱۹	۳۹/۸۸	۳۹/۷۵	۳۹/۸۵	۵۷۲/٤۷	۵۸۳/۰۱	۵۷٤/۵٦	۱/۸٤	۰/۳۷
۱۵	۱/۱٦	۲۵/۷۵	۳۵/۸۱	۳۵/۳۵	۳۵/٤۷	۵۸۳/۹۱	٦۲۱/۵۲	٦۱۱/۲۹	٦/٤٤	٤/٦۹
۱٦	۲/۵۱	۲۷/۷٦	٤۸/۳٤	٤۸/٤۲	٤۸/٦۵	٦۵۹/۸۵	٦۵۳/۲۹	٦۳٤/۱۸	−۰/۹۹	−۳/۸۹
۱۷	۳/۸۷	۲۹/۲٤	٤٦/۵۹	٤۷/۲۷	٤۷/٦٤	۷۱۵/۳۹	٦٦۰/۰٤	٦۲۹/۸٤	−۷/۷٤	−۱۱/۹٦
۱۸	٤/۵۹	۳۲/۷۲	۵٤/٦۷	۵۵/٤۲	۵۵/۸٦	۷۹۷/۰۵	۷۳۵/۷۷	۷۰۰/۳۹	−۷/٦۹	−۱۲/۱۳
۱۹	۱/۱۳	۲۹/۵۵	۳٦/۵٤	۳٦/۲۸	۳٦/۳۵	۷۰۸/۸۵	۷۳۰/۲٤	۷۲۳/٤	۳/۰۲	۲/۰۵
۲۰	۲/٤٤	۳۰/۵۵	٤۳/۰۸	٤۳/۳۸	٤۳/۵۸	۷۵۸/٦۷	۷۳۳/۹۲	۷۱۷/٤۷	−۳/۲٦	−۵/٤۳



شکل ٦ مقایسهٔ پیش‌بینی‌های به‌دست‌آمده از طریق رابطهٔ تجربی این مطالعه برای برج مطالعه‌شدهٔ سو و همکاران [3] با نتایج آن‌ها در شرایط V=0



شکل ٧ مقایسهٔ پیش‌بینی‌های به‌دست‌آمده از طریق رابطهٔ تجربی این مطالعه برای برج مطالعه‌شدهٔ ژائو و همکاران [19] با نتایج آن‌ها در شرایط ITD=29.2

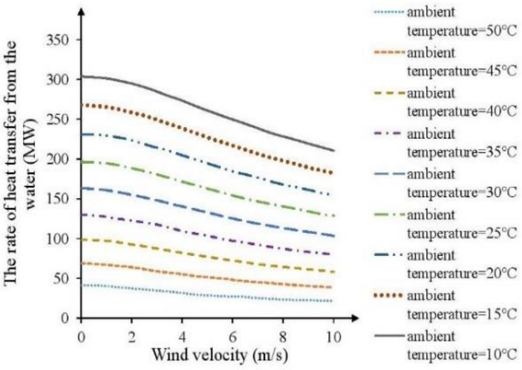
تأثیر پارامترهای محیطی بر روی برج هلر منفرد

دربارهٔ اثر دمای محیط بر عملکرد برج‌های هلر می‌توان گفت که هرچه هوای محیط گرم‌تر شود، چگالی آن کاهش می‌یابد و درنتیجه، اختلاف چگالی هوای محیط با هوای داخل برج کم می‌شود که درنهایت مکش هوا به داخل برج نیز کم می‌شود. درواقع اثر افزایش دما بر عملکرد برج به این صورت است که نه‌تنها باعث کم‌شدن میزان انتقال حرارت بین رادیاتورها و هوا در اثر کاهش اختلاف دما (ΔT) می‌شود، بلکه باعث کاهش جرم هوای ورودی به برج ($\dot{m}$) نیز می‌شود. این امر منجر به کاهش شدید راندمان برج خنک‌کن و درنتیجه کاهش توان خروجی توربین بخار می‌شود. اما اثر وزش باد بر عملکرد این نوع برج‌ها از فیزیک پیچیده‌تری برخوردار است و ممکن است تأثیر زیادی در پایین‌آوردن راندمان یک برج داشته باشد. درواقع هنگام بررسی عملکرد برج هلر می‌توان شرایط را به ٢بخش، یعنی شرایط نوزیدن باد و در وزش باد تقسیم کرد. در شرایط نوزیدن باد، دبی خروجی سیال از برج با حجم سیال عبوری از مبدل‌ها رابطهٔ مستقیمی دارد. اما در شرایط حضور باد، هوای خروجی از برج به‌علت وزش باد منحرف می‌شود و مؤلفه عمودی بردار سرعت خروجی از برج کاهش می‌یابد، بدین معنی که حجم هوای عبوری از روی رادیاتورها کاهش یافته است و درنتیجه انتقال حرارت به‌خوبی صورت نمی‌گیرد. همچنین عملکرد برج در سرعت‌های کم و زیاد باد متفاوت است. غفاری‌گوشه و گل‌نشان[١٢] نشان دادند که در سرعت‌های کم باد که مومنتوم سیال زیاد نیست، پدیده جدایش در بدنهٔ رادیاتورهای جانبی و پشت برج اتفاق نمی‌افتد، اما در سرعت‌های زیاد، اختلاف شدت جریان هوا در قسمت جلو و پشت رادیاتورها یک‌جفت ورتکس ایجاد می‌کند.

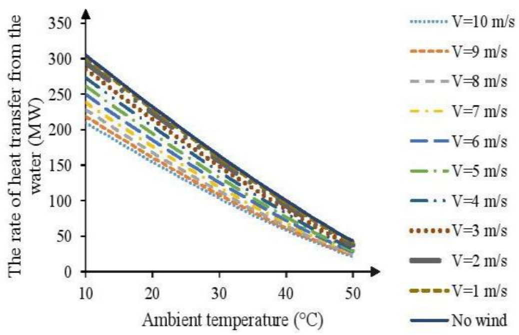
در این شرایط ممکن است در بعضی نقاط برج به‌علت تشکیل گردابه، فشار استاتیکی بیرون برج از فشار درون آن کمتر شود و در این نقاط هوای گرم از درون برج به بیرون جریان یابد که باعث افت شدید راندمان کل برج خواهد شد.

در این مطالعه با استفاده از مدل ریاضی ایجادشده، تأثیر پارامترهای دمای هوای محیط و سرعت باد بر عملکرد برج هلر بررسی می‌شود. شکل (۸) نرخ گرمای گرفته‌شده درون برج هلر را بر حسب سرعت باد برای چند دمای محیط مختلف نشان می‌دهد. در این نمودار فرض بر این است که دبی و دمای آب ورودی به برج برابر با حالت مرجع (جدول ۳) باشد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش سرعت باد نرخ گرمای گرفته‌شده از آب و همچنین راندمان حرارتی برج کم می‌شود. تئوری گفته‌شده در ابتدای این بخش نیز این موضوع را تأیید می‌کند. با تطبیق رابطه‌ای خطی به هر یک از منحنی‌های شکل (۸)، نشان داده می‌شود که با افزایش دمای محیط، شیب منحنی‌های شکل کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر در هنگام گرم‌ترشدن محیط، با افزایش سرعت باد، نرخ گرمای گرفته‌شده از آب آرام‌تر می‌شود و با شیب کمتری کاهش می‌یابد. علت فیزیکی این پدیده، کاهش اختلاف دمای بین آب و هوای ورودی به برج است که باعث می‌شود دبی هوای کمتری از برج عبور کند. در شرایط وزش باد، در دماهای بالای محیط، به‌علت حجم کم هوای عبوری از روی مبدل‌ها (و به‌تبع آن، کم‌بودن سرعت هوای خروجی از برج) تأثیر باد بر روی هوای خروجی بیشتر می‌شود و آن را بیشتر منحرف می‌کند. در نتیجهٔ این پدیده، مؤلفه عمودی سرعت هوای خروجی از برج (که نشان‌دهنده حجم هوای عبوری از روی مبدل‌ها و به‌تبع آن، نرخ انتقال حرارت است) کمتر از حالتی می‌شود که وزش باد یکسان ولی دمای محیط کم باشد. بنابراین، با افزایش سرعت باد مقدار گرمای گرفته‌شده از آب در دماهای بالای محیط آرام‌تر از حالات دمای کم محیط، کاهش می‌یابد.

شکل (۹) نرخ گرمای گرفته‌شده از آب را بر حسب دمای محیط نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، تغییرات نرخ انتقال حرارت از آب با افزایش دمای محیط و ثابت‌ماندن بقیه پارامترها به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. همین نتیجه برای تغییرات دمای آب خروجی از برج با تغییرات دمای محیط نیز صادق است. بررسی شیب هر خط در این شکل نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد، شیب تغییرات نرخ انتقال حرارت برای یک بازه دمای محیطی یکسان، کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر مقدار کاهش نرخ انتقال حرارت به‌ازای افزایش دمای محیط در مواقعی که سرعت وزش باد کمتر است، زیاد می‌شود. درنتیجه در سرعت‌های کم باد، درجهٔ حرارت محیط نقش خیلی مهمی در عملکرد برج ایفا می‌کند.



شکل ۸ نرخ گرمای گرفته‌شده از آب درون برج هلر منفرد برحسب تغییرات سرعت باد برای دماهای محیط مختلف



شکل ۹ نرخ حرارت گرفته‌شده از آب درون برج هلر منفرد برحسب دمای محیط برای سرعت‌های وزش باد مختلف

جدول ٦ شرایط مرجع برای اعمال تئوری Ma و همکاران [10] بر ٣برج هلر هم‌راستا

حالت	مشخصات جریان هوا	برج	دمای هوای اطراف برج (°C)	دمای آب ورودی به برج (°C)	دمای آب خروجی از برج(°C)	دبی حجمی آب گذرنده از برج (m^3/s)
١	سرعت باد= ٢/١٣m/s جهت باد= عمود بر راستای ٣برج	١ (اول)	٢٦/٢١	٥٤/٧٥	٤٥/٦٧	٤/١٧
		٢ (وسط)	٢٧/٢٧	٥٦/١٤	٤٧/٢٣	٤/٣٠
		٣ (آخر)	٢٧/٣١	٥٨/٢٣	٤٩/٢٢	٤/٦٤
٢	سرعت باد= ١/١١m/s جهت باد= هم جهت با راستای ٣برج	١ (در خط حمله وزش باد)	٢٣/١١	٥٣/٥٨	٤٤/٨١	٤/١٦
		٢ (وسط)	٢٤/٧١	٥٤/٣	٤٥/٨١	٤/٥٥
		٣ (آخر)	٢٥/٩٣	٥٦/٥١	٤٧/٨٤	٤/٧١

جدول ٧ نتایج حل عددی معادلات (١)، (٢)و (٣) برای شرایط مرجع حالت اول (جهت باد عمود بر راستای برج‌ها)

شمارهٔ برج	دمای هوای خروجی از برج (°C)	نرخ گرمای گرفته‌شده از آب در برج (MW)
١ (اول)	٤٠/٤٨	١٥٦/٤١
٢ (وسط)	٤١/٧	١٥٨/١٨
٣ (آخر)	٤٢/٧٧	١٧٢/٤٦

تأثیر پارامترهای محیطی بر روی ٣ برج هلر هم‌راستا

در برج‌های هلر منفرد به‌علت هندسه متقارن برج، جهت باد پارامتر مهمی نیست و فقط سرعت باد و درجه‌حرارت محیط است که در عملکرد برج تأثیرگذار است. ولی در مجموعهٔ برج‌های کنار هم، جهت باد عاملی است که می‌تواند عملکرد حرارتی برج‌ها را کاهش دهد یا بهبود بخشد و بررسی آن برای یافتن راهکاری برای بهبود عملکرد برج‌ها ضروری است. در این قسمت به کمک تئوری Ma و همکاران [10]، عملکرد ٣ برج هلر هم‌راستا در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس در ٢ حالت اصلی جهت وزش باد که شامل عمود بر راستای برج‌ها و هم‌جهت با راستای برج‌هاست، مقایسه شده است.

حالت اول: جهت وزش باد عمود بر را ستای برج‌ها. در این حالت از وزش باد، شرایط مرجع ٣برج هلر برای اعمال الگوریتم Ma و همکاران [10] براساس داده‌برداری از مرکز کنترل نیروگاه به‌دست آمده و در جدول (٦) (حالت ١) نشان داده شده است. نتایج حل عددی معادلات (١)، (٢) و (٣) برای به‌دست‌آوردن میزان گرمای منتقل‌شده در برج در شرایط بالا نیز در جدول (٧) آورده شده است.

از آن‌جا که الگوریتم ارائه‌شدهٔ Ma و همکاران [10] فقط برای یک برج هلر منفرد قابل اعمال بوده است و اثرات برج‌ها بر یکدیگر را در نظر نمی‌گیرد، باید در اعمال آن به حالت ٣ برج هم‌راستا دقت کرد. در حالتی که اثر وزش باد عمود بر برج‌هاست، هر برج در معرض مستقیم وزش باد قرار دارد و در شرایط وزش باد غیرشدید، هوای خروجی از هر برج بر ٢برج دیگر تأثیری ندارد. درنتیجه، تغییرات رفتار جریان هوا حول هر برج در شرایط محیطی تحلیل، که در ادامه بیان می‌شود، نسبت به حالت مرجع، که اندازه‌گیری شده است، مشابه با تغییرات رفتار جریان حول برج منفرد

عمل می‌کند. بنابراین، الگوریتم یادشده برای تحلیل جریان حول هر برج قابل استفاده است. از آن‌جا که شرایط آب ورودی و دمای محیط برای هر برج فرق می‌کند، قیاس آن‌ها غلط است. برای رفع این مشکل یک حالت دل‌خواه مطابق با جدول (۸) برای هرکدام از برج‌ها در نظر گرفته شده و با استفاده از الگوریتم Ma و همکاران [10] عملکرد هر ۳برج در شرایط یکسان محاسبه و مقایسه شده است. لازم به ذکر است فرضیات طوری در نظر گرفته شده است که اختلاف دمای اولیه (ITD) در حالت مرجع هر برج و شرایط فرض‌شده تقریبا برابر شود.

همچنین از آن‌جا که در سرعت‌های بالای وزش باد جریان حول برج‌ها بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند و استفاده از الگوریتم دچار اشکال می‌شود، محاسبات فقط برای سرعت‌های کم وزش باد انجام شده است. نرخ گرمای گرفته‌شده از آب درون برج‌ها براساس سرعت باد در جدول (۹) آورده شده است. همان‌طور که از این جدول مشخص است، در حالتی که وزش باد عمود بر راستای برج‌هاست، عملکرد ۳برج تقریبا مشابه یکدیگر بوده و در حالت نوزیدن باد نزدیک‌ترین مقدار نرخ انتقال حرارت را داراست. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت باد، برج ۱ و ۳ عملکردهای تقریبا یکسانی (یا با اختلاف یکسان) دارند، ولی عملکرد برج وسط (برج شماره ۲) درحال فاصله‌گرفتن از ۲برج دیگر در جهت منفی است. علت این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در این حالت از وزش باد و چیدمان برج‌ها به‌علت کاهش سطح مقطع هوای عبوری در فاصلهٔ بین برج‌ها، فشار بیرونی رادیاتورها کم می‌شود که این افت فشار برای برج ۲ نسبت به ۲برج دیگر به‌ویژه در مواقع وزش باد شدیدتر است و باعث می‌شود دبی هوای کمتری وارد این برج شود و انتقال حرارت به‌خوبی ۲ برج دیگر انجام نشود. البته این افت فشار برای هر ۳ برج وجود دارد و می‌توان گفت در این وضعیت از وزش باد، هر برج به‌صورت منفرد راندمان بهتری از ۳ برج هم‌راستا در کنار هم خواهد داشت.

جدول ۸ فرضیات گرفته‌شده برای محاسبهٔ عملکرد برج‌ها در حالت اول (جهت باد عمود بر راستای برج‌ها)

دمای هوای محیط (°C)	۲۷
دمای آب ورودی به برج‌ها (°C)	۵۸
دبی حجمی آب ورودی به برج‌ها (m^3/s)	٤/٦

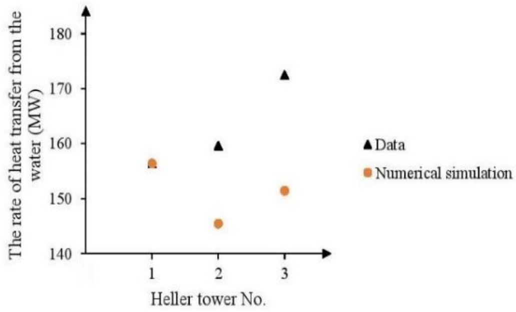
جدول ۹ نرخ انتقال حرارت از ۳برج در حالت اول (جهت باد عمود بر راستای برج‌ها) [مگاوات]

سرعت باد (m/s) / شمارهٔ برج	۰	۱	۲
۱ (اول)	۱۸۱/۳۰	۱۷۹/٤۰	۱۷٤
۲ (وسط)	۱۸۱	۱۷۸/۹۰	۱۷۳/٤۰
۳ (آخر)	۱۸۱/۲۰	۱۷۹/۲۵	۱۷۳/۹

حالت دوم: جهت وزش باد هم‌جهت با راستای برج‌ها. در این حالت یکی از برج‌ها در خط حملهٔ وزش باد قرار دارد و ۲برج دیگر در پناه برج اول قرار می‌گیرند و باد مستقیم به آن‌ها برخورد نمی‌کند.

بنابراین، نمی‌توان از روش Ma و همکاران [10] برای مشابه‌سازی شرایط ۳ برج استفاده کرد. در این قسمت باتوجه‌به این‌که هر ۳برج از لحاظ هندسی با یکدیگر مطابقت دارند، داده‌های خوانده‌شده برای برجی که در خط حملهٔ وزش باد قرار دارد، به‌عنوان مرجع برای ۲برج دیگر قرار گرفته است و عملکرد هرکدام از برج‌ها با عملکرد برج اول مقایسه شده است. از آن‌جا که هر ۳برج نیروگاه ساختار فیزیکی مشابهی دارند، فرض بالا مناسب است. شرایط مرجع برای اعمال روش Ma و همکاران [10] براساس داده‌برداری از مرکز کنترل نیروگاه در یک زمان مشخص در جدول (٦) (حالت ۲) آورده شده است. نتایج حل عددی معادلات (۱)، (۲) و

(۳) برای به‌دست‌آوردن نرخ گرمای گرفته‌شده از آب در شکل (۱۰) آورده شده است (حالت خوانده‌شده).



شکل ۱۰ مقایسهٔ نرخ انتقال حرارت در هرکدام از برج‌ها در ۲حالت واقعی و شبیه‌سازی (حالت وزش باد هم‌جهت با راستای برج‌ها)

مقدار محاسبه‌شده نرخ انتقال گرمای هر برج با استفاده از الگوریتم Ma و همکاران [10] با استفاده از مرجع‌قراردادن برج موجود در خط حملهٔ وزش باد، نیز در شکل (۱۰) نشان داده شده است (حالت محاسبه‌شده). در این‌جا فرض بر این است برجی که در خط حملهٔ وزش باد قرار دارد (برج ۱)، مانند برج منفرد عمل می‌کند. این فرض در سرعت‌های کم وزش باد (مانند حالت فعلی) فرض غلطی نیست، ولی در سرعت‌های زیاد قضیه متفاوت است. هنگامی که چندین برج پشت سر هم در معرض وزش باد قرار می‌گیرند، برجی که در خط حملهٔ وزش باد قرار دارد، نسبت به یک برج منفرد در معرض وزش باد، دچار افت عملکرد خواهد شد که دلیل این امر مکش برج پشتی و تأثیر آن بر برج جلویی است، زیرا باعث کاهش حجم هوای ورودی به برج خط حملهٔ وزش باد می‌شود. این پدیده را می‌توان با مقایسهٔ نرخ انتقال حرارت در شکل (۱۰) برای برج‌های ۲ و ۳ در حالت خوانده‌شده و محاسبه‌شده نیز دریافت کرد. همچنین این شکل نشان می‌دهد هنگامی که چندین برج پشت سر هم در مسیر باد قرار می‌گیرند، برج‌های پشتی نسبت به برجی که در خط حملهٔ وزش باد قرار دارد، عملکرد بهتری خواهند داشت. دلیل این پدیده این است که برجی که در خط حملهٔ وزش باد قرار دارد، به‌عنوان سپری در مسیر باد برای برج‌های پشتی قرار می‌گیرد و درنتیجه، مؤلفه عمودی بردارهای سرعت خروجی از برج‌های پشتی (که بیانگر حجم هوای ورودی به برج است) تقویت می‌شود و مکش این برج‌ها افزایش می‌یابد که باعث بهترشدن روند انتقال حرارت در این برج‌ها می‌شود.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

نتایج بررسی داده‌های جمع‌آوری‌شده از مرکز کنترل نیروگاه سیکل ترکیبی فارس برای یک برج خنک‌کن نوع هلر واقع در این نیروگاه و استفاده از یک روش نظری جدید در تحلیل آن نشان می‌دهد که برای محاسبه و پیش‌بینی عملکرد برج هلر منفرد در معرض شرایط محیطی مختلف می‌توان یک رابطهٔ ریاضی شامل ۳ضریب و یک حالت مرجع به‌دست آورد. این ۳ضریب وابسته به اختلاف دمای اولیه و سرعت باد در حالت مرجع و اختلاف دمای اولیه و سرعت باد در حالت خواسته‌شده است. لازم به ذکر است که رابطهٔ ریاضی گفته‌شده مانند روش نظری فقط برای سرعت‌های باد کمتر از سرعت بحرانی، که معمولاً مقداری بسیار بزرگ و غیرمعمول در شرایط عملیاتی برج است، کاربرد دارد. با استفاده از این مدل ریاضی برای محاسبه عملکرد برج‌های مطالعات دیگر، نشان داده شد که برج‌های دیگر نیز در برابر تغییر شرایط محیطی رفتار تقریبا یکسانی از خود نشان می‌دهند و می‌توان با بررسی برج‌های متنوع‌تر، نمودارهای جامعی برای رابطهٔ داده‌شده، برای پیش‌بینی عملکرد انواع برج‌ها به‌دست آورد.

به کمک مدل ریاضی ایجادشده برای برج هلر منفرد در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس، رفتار این برج در شرایط مختلف محیطی تحلیل شد و نتایج زیر به‌دست آمد:

۱. در هنگام افزایش دما، افزایش سرعت باد باعث می‌شود که نرخ انتقال حرارت صورت‌گرفته در برج با شیب کمتری کاهش یابد یا به‌عبارت دیگر در سرعت‌های زیاد باد، افزایش دمای محیط می‌تواند مانع از افت شدید راندمان برج شود.

۲. در مواقعی که سرعت باد کم است، نرخ انتقال حرارت در برج در دماهای بالای محیط با شیب بیشتری نسبت به دماهای کم محیط کاهش می‌یابد که اهمیت درجه‌حرارت محیط را در این مواقع نشان می‌دهد.

با استفاده از روش نظری جدید و داده‌برداری از مرکز کنترل نیروگاه برای ۳برج هلر هم‌راستا واقع در این نیروگاه، اثر دمای محیط و سرعت باد بر روی این برج‌ها در ۲حالت بررسی شده است:

حالت اول: جهت وزش باد عمود بر راستای برج‌ها: در این حالت نشان داده شد که برج منفرد در معرض وزش باد عملکرد بهتری نسبت به هر ۳برج خواهد داشت. به‌علت این‌که در حالت ۳برج کنار هم، فضای بین ۲ برج و مکش هر برج باعث می‌شود برج کناری‌شان نتواند به‌خوبی هوا را مکش کند. همچنین نتایج نشان داد که در مواقعی که سرعت باد زیاد است، برج وسط عملکرد بدتری نسبت به ۲برج دیگر پیدا می‌کند.

حالت دوم: جهت وزش باد هم‌جهت با راستای برج‌ها: نتایج نشان داد که برجی که در خط حملهٔ وزش باد قرار دارد، باعث کاهش اثر باد در هوای خروجی برج‌های پشتی و درنتیجه باعث افزایش راندمان برج‌های پشتی نسبت به خودش می‌شود. همچنین نشان داده شد که برج در خط حملهٔ وزش باد در این وضعیت عملکرد به‌مراتب ضعیف‌تری نسبت به همان برج در حالت منفرد و در همان وضعیت وزش باد دارد که علت این امر مکش برج پشتی و تأثیرش بر کاهش هوای ورودی به برج فعلی ارزیابی شد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از لطف مدیرعامل محترم و کارکنان صدیق نیروگاه سیکل ترکیبی فارس برای دراختیارگذاشتن داده‌های نیروگاهی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

فهرست علائم

علائم لاتین

مساحت (m^2)	A
ظرفیت گرمایی ویژه ($J\ kg^{-1}K^{-1}$)	C_p
دبی جرمی هوای عبوری از یک مبدل حرارتی ($kg\ s^{-1}$)	G_1
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$)	h
اختلاف دمای اولیه (K)	ITD
ضریب هدایت حرارتی لوله ($W\ m^{-1}K^{-1}$)	k
ضریب در مدل ریاضی	M_1
ضریب در مدل ریاضی	M_2
ضریب در مدل ریاضی	M_3
دبی جرمی ($kg\ s^{-1}$)	$\dot{m}$
تعداد واحدهای انتقال	NTU
مقدار گرمای مبادله‌شده در برج (W)	Q
دما (K)	T
ضخامت لوله (m)	t
ضریب انتقال حرارت کلی ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$)	U
سرعت باد ($m\ s^{-1}$)	V

علائم یونانی

وزن مخصوص ($N\ m^{-3}$)	γ
بازده مبدل حرارتی	ε
راندمان فین	η

زیرنویس

شرایط مبنا (دمای ۱۵°C و فشار یک اتمسفر)	0
هوا	a
برحسب سطح سرد	c
سطح جلویی یک مبدل حرارتی	F
سطح خارج لوله	f

سطح جلویی مبدل حرارتی	fr	متوسط	mean
سطح داخلی لوله	I	خروجی از برج	o
ورودی به برج	i	شرایط مرجع	ref
میانگین سطح تبادل حرارت جدار لوله	m	آب خنک‌کن	w

مراجع

1. du Preez, A. F., and Kröger, D. G., "Effect of wind on performance of a dry-cooling tower", *Heat Recovery Systems and CHP*, Vol. 13, pp. 139-146, (1993).
2. Wei, Q. -d., Zhang, B. -y., Liu, K. -q., Du, X. -d., and Meng, X.-z., "A study of the unfavorable effects of wind on the cooling efficiency of dry cooling towers", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 54-55, pp. 633-643, (1995).
3. Su, M.D., Tang, G.F., and Fu, S., "Numerical simulation of fluid flow and thermal performance of a dry-cooling tower under cross wind condition", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 79, pp. 289-306, (1999).
4. Al-Waked, R., and Behnia, M., "The performance of natural draft dry cooling towers under crosswind: CFD study", *International Journal of Energy Research*, Vol. 28, pp. 147-161, (2004).
5. Ghafari, S., Golneshan, A. -A., and Mokhtarpoor, R., "Effect of crosswind and air temperature on the thermal performance of Natural Draft Dry Cooling Tower (NDDCT)", *16th Annual (International) Conference on Mechanical Engineering-ISME, Shahid Bahonar University*, Kerman, Iran, (2008).
6. Ma, H., Si, F., Li, L., Yan, W., and Zhu, K., "Effects of ambient temperature and crosswind on thermo-flow performance of the tower under energy balance of the indirect dry cooling system", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 78, pp. 90-100, (2015).
7. Ardekani, M. A., Farhani, F., and Mazidi, M., "Effects of cross wind conditions on efficiency of Heller dry cooling tower", *Experimental Heat Transfer*, Vol. 28, pp. 344-353, (2015).

۸. شمسی‌پور، عباس و گل‌نشان، علی‌اکبر، "بررسی عددی عملکرد رادیاتورهای برج هلر تحت‌تأثیر وزش باد بر ورودی و خروجی برج"، بیست‌وچهارمین همایش سالانه مهندسی مکانیک ایران، یزد، ایران، (۱۳۹۵).

9. Hooman, K., "Theoretical prediction with numerical and experimental verification to predict crosswind effects on the performance of cooling towers", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 36, pp. 480-487, (2015).
10. Ma, H., Si, F., Kong, Y., Zhu, K., and Yan, W., "A new theoretical method for predicating the part-load performance of natural draft dry cooling towers", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 91, pp. 1106-1115, (2015).
11. Fu, S., and Zhai, Z., "Numerical investigation of the adverse effect of wind on the heat transfer

performance of two natural draft cooling towers in tandem arrangement", *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 17, pp. 24-34, (2001).

۱۲. غفاری‌گوشه، صمد و گل‌نشان، علی‌اکبر، "بررسی عددی سه‌بعدی عملکرد ۳برج خنک‌کننده خشک هم‌راستا با مکش طبیعی (NDDCT) تحت وزش باد"، اولین کنفرانس ملی صنعت نیروگاه‌های حرارتی (گازی، سیکل ترکیبی، بخاری)، تهران، ایران، (۱۳۸۸).

۱۳. آروین‌فر، محمدعلی، "بررسی عددی سه‌بعدی اثر چیدمان مثلثی ۳برج خنک‌کننده خشک با مکش طبیعی تحت وزش باد"، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، (۱۳۹۱).

۱٤. جهانگیری، علی، "بررسی عددی سه‌بعدی اثر تزریق دود خروجی از نیروگاه سیکل ترکیبی به درون ۳برج خنک‌کننده خشک هم‌راستا با مکش طبیعی تحت وزش باد"، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، (۱۳۸۸).

15. Iran Power Development Company (I.P.D.C.) Project, "Thermotechnical calculation of main cooling system", Report, Fars Combined Cycle/ Main & Aux. Cooling System, (2005).

16. EGI, "Thermotechnical and aerodynamic design/ calculation/ characteristics of the dry cooling plant system heater", Report Vol. A, Budapest Institute of Engineering, (1985).

17. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine A. S., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 669-706, (2006).

۱۸. جهانگیری، علی و گل‌نشان، علی‌اکبر، "بررسی بهبود عملکرد ۳برج خنک‌کن هلر هم‌راستا تحت وزش باد با استفاده از تزریق دود اگزوز و دیواره‌های بادشکن"، بیست‌وچهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ایران، (۱۳۸۸).

19. Zhao, Y. B., Long, G., Sun, F., Li, Y., and Zhang, C., "Numerical study on the cooling performance of dry cooling tower with vertical two-pass column radiators under crosswind", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 75, pp. 1106-1117, (2015).

Thermal Performance Analysis of Natural Draft Dry Cooling Towers based on New Theoretical Method

Amin Khodakaram-Tafti[1] Ali-Akbar Golneshan[2]

1. Introduction

Thermal power plants are one of the most important industrial sectors for electricity generation in many countries. Therefore, it is necessary to study and analyze components of the power plant to predict their performances at operational conditions. Several factors cause the power output of a steam turbine to be less than expected. One of these factors is that the power plant's cooling water does not cool well when passing through the cooling tower. One of the most widely used power plant cooling towers is the natural draft dry cooling tower (NDDCT). In this type of cooling tower, the need for make-up water is small and therefore, it is appropriate for areas with lack of water such as arid and semi-arid regions. Natural draft dry cooling towers would be affected by environmental conditions more than other types of cooling towers. Engineers are always looking for a quick and optimal method to calculate the NDDCTs' performance in different environmental conditions. This method should give an initial estimate of the NDDCTs' performance without any special software or heavy computational runs. Obtaining simple algebraic models for such a purpose is beneficial. Theoretical studies and models derived from this type of studies can mainly be helpful in achieving such general mathematical relations. In this study, a single NDDCT of Fars Combined Cycle Power Plant was used and a simple algebraic mathematical model was obtained by applying a recently presented theoretical method. This model calculates the performance of the mentioned cooling tower under different environmental conditions (wind velocity and ambient temperature). The performance of the single NDDCT and the three aligned NDDCTs of Fars Combined Cycle Power Plant were analyzed under different environmental conditions by using the proposed model.

2. Measurements and Analysis

The studied cooling towers are three aligned Heller-type NDDCT located in the Fars Combined Cycle Power Plant. For creation and validation of the mathematical model, the following data were collected every 15 minutes during a day for each NDDCT and were averaged over every hour: mass flow rate of water, inlet, and outlet water temperature, ambient temperature, wind velocity, and direction. The amount of heat released from the water in the tower ($\dot{Q}$) is obtained from the conservation of energy equations. The *ε-NTU* method is used for analyzing the thermal performance of radiators around each cooling tower. *ε* is the effectiveness of heat exchanger and *NTU* is the number of transfer units.

3. Results and Discussion

Mathematical modeling of the single NDDCT. Previous studies have shown that at low wind velocities, the performance of three aligned NDDCT is almost the same as a single NDDCT exposed to wind. Therefore, at a proper ambient condition, the data of NDDCT in the attack line of wind were measured and was set as a reference condition to create the mathematical model. Reference condition is the actual performance data of a cooling tower, measured under a controlled data of environmental conditions (ambient temperature and wind velocity). Equation 1 is the mathematical relation created to calculate the performance of NDDCT under any desired condition. This model is only applicable for wind velocities less than critical velocity, which is usually large and uncommon in operational conditions.

$$\dot{Q} = M_1 M_2 M_3 \dot{Q}_{ref} \quad (1)$$

$\dot{Q}$ and $\dot{Q}_{ref}$ are the amount of heat transferred in the NDDCT at the desired and reference condition, respectively. The values of M_1, M_2 and M_3 coefficients depended on the values of wind velocity and initial temperature difference (*ITD*) of NDDCT at the reference and desired conditions.

Effect of environmental parameters on the performance of the single NDDCT. The effect of ambient temperature and wind velocity on the performance of a single NDDCT is investigated by using the created mathematical model. Figure 1 shows the effect of wind velocity on heat transfer rate in the NDDCT for different ambient temperatures. It is assumed that the flow rate and temperature of the water entering the tower are the same as the reference condition. As shown, when the wind velocity increases, the rate of heat transfer in the tower as well as its thermal efficiency decrease. Moreover, it is shown that in high ambient temperatures, as the wind velocity increases, the rate of heat transfer in the cooling

[1]. Corresponding author: PhD Candidate, Department of Thermo-Fluid Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: am.khodakaram@shirazu.ac.ir
[2]. Associate Professor, Department of Thermo-Fluid Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

tower decreases with a lower slope. Figure 2 shows the effect of ambient temperature on the cooling tower's heat transfer rate. As shown, the NDDCT's heat transfer rate decrease linearly as the ambient temperature increases and assuming that the other parameters remain constant. Moreover, it is shown that, as wind velocity increases, the slope of the curve of heat transfer rate decreases in the same range of ambient temperatures. Thus, ambient temperature plays an important role in the cooling tower's performance at low wind velocities.

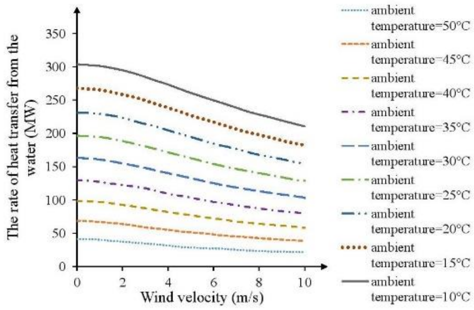


Figure 1. The effect of wind velocity on the rate of heat transfer in the NDDCT for different ambient temperatures

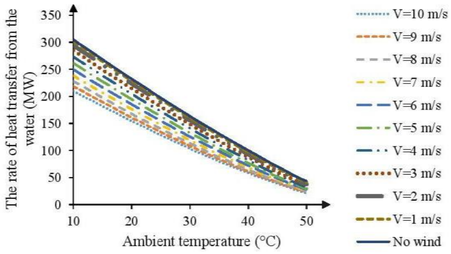


Figure 2. The effect of ambient temperature on the rate of heat transfer in the NDDCT for different wind velocities

Effect of environmental parameters on the performance of the three aligned NDDCTs

With the new theoretical method, the performance of three aligned cooling towers is investigated in the two conditions of wind direction, perpendicular to the towers and in line with the towers' direction.When the wind direction is perpendicular to the cooling towers, each tower is exposed directly to the wind and when the wind is not strong enough, the exiting air plume of each tower has no impact on the other two towers. Therefore, the method can be applied to each tower by considering low wind velocities. Moreover, because the inlet water conditions and ambient temperature are different for each tower, it is wrong to compare their performances. For solving this problem, a specific condition is assumed for each cooling tower and by using the new method, the performance of the three NDDCT is compared under the same condition. It is shown that as wind velocity increases, the performance of the middle NDDCT gets worse than the two side NDDCTs. At this condition of wind direction, the efficiency of each tower is lower than the single tower in the same condition. When the wind direction is in line with the direction of towers, one of the towers gets directly in the wind attack and others get in the back of this tower. Therefore, the new method cannot be applied to the three NDDCTs. In order to compare the towers' performance in this condition, the data of the tower in the wind attack line is set as the reference condition for the other two towers. Since all three towers have the same structure, this assumption is appropriate. It is shown that the performance of the tower in the wind attack line will reduce compared to a single tower exposed to wind due to the suction of the rear tower and its effect on the front tower. Moreover, it is shown that when the wind is in line with the direction of towers, the efficiency of the rear towers will increase from the tower in the wind attack line. The reason is that the tower in the wind attack line acts as a shield against the wind for the rear towers and as a result, the vertical component of the exiting air plume velocity vector of these towers increases. This velocity component indicates the volume rate of air entering the tower; therefore, air suction of the rear towers increases and makes the heat transfer rate increase.

4. Conclusion

In this study, a simple mathematical model was created to predict the performance of the Heller-type natural draft dry cooling tower (NDDCT) located in the Fars Combined Cycle Power Plant. The thermal behavior of a single cooling tower in different environmental conditions was analyzed by using this model. It was obtained that as the ambient temperature increases, the increase in wind speed causes the heat transfer rate in the cooling tower to decrease with a lower slope. Moreover, it was shown that at low wind velocities, ambient temperature plays an important role in the performance of NDDCT. Using the new theoretical method, along with the measured data, for calculating the performance of three aligned cooling towers in the Fars Combined Cycle Power Plant, the following results were obtained:1. When the wind direction is perpendicular to the NDDCTs, the performance of a single tower will be better than all the three aligned cooling towers' performance. Also, it was shown that as wind velocity increases, the performance of the middle NDDCT gets worse than the two side NDDCTs. 2. When the wind direction is in line with the direction of towers, the cooling tower in the wind attack line reduces the effect of wind on the exiting air plume of the rear towers and, therefore, increases the efficiency of the rear towers than itself. Moreover, it was shown that the performance of the cooling tower in the wind attack line would reduce compared to a single tower exposed to wind.